DOI:
张震 数字乘法器算法自有技术与表计高品质产品设计研究［J］. ****，****，**，（**）：00-00
ZHANG Zhen Research on the design of digital multiplier algorithm and high-quality products of metering［J］. ****，****，**，（**）：00-00

数字乘法器算法自有技术与表计高品质产品设计研究

张震 [1]
(1.华能济南黄台发电有限公司，山东 济南 250100)

摘 要：讨论了 2023 年瑞士兰吉尔（珠海）公司在中国推出新一代高端计量与分析电能表（E860 系列）的背景，以及国内外高端电能表市场的现状和技术挑战。文章特别强调了数字乘法器算法在高端电能表中的核心作用，并回顾了历史上几家重要公司在该领域的贡献和技术发展。同时，文章也指出了现有电能表标准在测试评估方面的不足，并呼吁行业关注电能计算标准化问题。

关键词：数字乘法器 算法 高端电能表
中图分类号：TM933.4 **文献标识码：** **文章编号：**

Research on the design of digital multiplier algorithm and high-quality products of metering

ZHANG Zhen[1]
(1.Huaneng Jinan Huangtai Power Generation Co.，Ltd.，Jinan，shandong 250100，China)

Abstract: The background of the launch of a new generation of high-end metering and analysis energy meters (E860 series) by Switzerland Rangier (Zhuhai) in China in 2023 was discussed, as well as the current situation and technical challenges of the high-end energy meter market at home and abroad. In particular, the article highlights the central role of digital multiplier algorithms in high-end energy meters, and reviews the contributions and technological developments of several important companies in this field throughout history. At the same time, the article also points out the shortcomings of the existing energy meter standards in terms of testing and evaluation, and calls on the industry to pay attention to the standardization of electric energy calculation.

Key words: Number multiplier algorithm High-end meters

作者简介：张震 男 ， (1977-)， 从事电能计量技术研究 721047546@qq.com

0 前言

2023年，瑞士兰吉尔（珠海）公司发布：在中国推出新一代0.1S/E级、E860系列高端计量与分析电能表生产与应用。这是兰吉尔用新一代高品质电能表参与中国国内高端电表市场的竞争。

目前在国内，只有威胜集团于2011年推出0.1S级高品质关口表；而大部分国产高端电能表，主要市场在国内，难以进入国际高端电表市场。其主要原因之一，国产高端电能表是根据IEC标准、国标、国网标准开发应用。这些电表标准，只规定电能表通用技术要求及基本误差要求、使用环境气候条件、测试方法等。因此，高端电能表只具有设定的测量类型、测量功能，基本性能和指标；对高端电能表采用的原理和结构，电表标准没有明确的条文规定。这就表明；电表制造企业可以自行设计功能器件、零部件、线路及软件。

现在的高端电能表，数字乘法器是关键部件。鉴于表计测量类型、测量功能和基本性能，都由算法（包括基本算法、配套算法、补偿算法）计算确定，因此，算法及软件是数字乘法器的核心技术。不同厂家产品：即使表计硬件相同，基本性能符合标准要求，其实际产品品质水准、性能优化程度，因数字乘法器算法及软件水准不同，出厂误差内控水准不一，导致产品品质差异很大。同时，现有电能表标准对EMC/EMI性能测试、软件运算及多点软件系统修正方法，都不能有效进行测试评估。

长期以来，进口高端电表算法及软件是自有技术，都不公开；国产高端电表，只有威胜集团、国网电科院、湖南电力计量中心发布过这方面的报道。因此，本文对国产高端电能表高品质产品设计与应用，重点讨论数字乘法器算法自有技术应用现状，经过表计品质差异比较，提出高端电能表高品质产品设计技术要求。

这里提示：多年前，国网电科院提出电能计算标准化问题，也需要引起行业的关注与研究。

1、 高端电能表的数字乘法器实用算法类型与表计实现高品质要素

1 ）从国际上第一台采用数字乘法器的交流电度表说起

2020年5月16-17日，在网上：

— 本文作者：国际上，第一台采用数字乘法器的交流电度表，由哪个国家、那个公司开发生产？电表生产年份？采用数字乘法器原理？

— 网上计量专家：应该是日本

— 本文作者：日本横河发明时分割乘法器，推出国际上第一台采用模拟乘法器的交流电度表，这是有资料可以查证。但是，国际上，第一台采用数字乘法器的交流电度表，暂时还不明朗。

— 网上计量专家：最有可能是德国。

— 大海为伴：那是八十年代初期的产品。1983年，哈表所当时为抚顺吕厂“154”工程 采购了该样机。我曾有其产品样本，后来丢了。据我当时了解，那是国际上第一款采用数字方法做的乘法器。

— 大海为伴：我当时曾经试尝仿制。但当时买不到哪个芯片。后来，采用其它方案。

— 大海为伴：美国科学哥伦布公司利用“压扩码编译码器”芯片和单片机技术做出了采用数字乘法器的三相多功能电能表。

— 本文作者：“大海为伴”提供的美国科学哥伦布公司研发数字电能表信息，很重要。1974年，该公司推出SC10、SO50标准表，对非正弦波分析及功率测量中应用，有很多研究成果。

以上讨论说明，1983年前，美国科学哥伦布公司推出三相多功能表，采用数字方法做的乘法器，其数字乘法器结构，采用“压扩码编译码器”芯片和单片机技术，是国际上早期的数字乘法器算法类型，但其数字乘法器算法，尚待查证。

2 ）瑞士兰吉尔公司

—1971，兰吉尔推出第一台电子式电度表，采用时分割乘法器。

— 1990年前，兰吉尔研发出0.01级电子式单相标准表。有功计量采用时分割乘法器，无功计量采用电子移相90度的方法。

— 1993年，兰吉尔生产ZU型0.2S级高精度结算关口表，采用时分割乘法器。

— 2004年，兰吉尔生产新一代关口计量精品-ZQ型0.2S级高精度结算关口表。采用数字乘法器及自有核心技术芯片。

概括的说：2004年，兰吉尔推出采用数字乘法器芯片的ZQ型新一代关口表。但其数字乘法器结构及算法是自有技术，不公开。

3 ）威胜集团

— 1994年，威胜推出中国第一台0.5S级三相多功能表。其数字乘法器采用A/D采样、电能计算采用点积算法及软件技术。

— 2002年，威胜研发出中国第一台DTSD

341-9A/B/C型0.2S级、具有谐波计量功能的三相多功能表，其数字乘法器采用积分算法，计算全波电能、基波电能、谐波电能；谐波分解，采用傅立叶变换算法。

— 2006年，威胜推出中国第一台0.2S级数字化变电站专用的数字化电能表。

数字化变电站需要安装的数字化电能表，不具备传感变换功能。数字化电能表接收合并单元输出的报文，表计本身只进行纯数字量计算。

数字化电能表实际上存在的计量误差：

•高吞吐量下，采样数据帧接收效率问题。因网络环境差异或端口流量过大，发生报文丢失或不连续现象。

•电能计量算法误差。对有功电能算法，常用方法有直接点积分、复化辛普森（Simpsons）、复化牛顿-柯特斯（Newton -Cotes)等算法，其误差阶次不同，将引入不同精度误差。

用数字化电能表的计算窗内的等距离间隔，由合并单元决定。所以使用复化辛普森或复化牛顿-柯特斯等插值型求积，引入误差基本在1•10^-5以下。

注1：Newton- Cotes公式，被积函数为插值多项式的求积公式。常用插值多项式有梯形法则、辛普森法则，都是数值积分公式。

注2：辛普森法则，采用抛物线形求积公式。

以上叙述可见，威胜的数字化电能表数字乘法器，其有功电能计算，采用复化辛普森（Simpsons)、复化牛顿-柯特斯(Newton -Cotes)点积算法。

— 2010年，威胜研发出中国首款DTSD -9ZV1.0型高精度冲击负荷三相多功能表

本部分内容摘自威胜集团发表的《自适应陷波滤波器在非线性负荷电能计量中的应用》，并经编辑而成。

新型冲击负荷电能表，在非线性信号条件下，采用消耗电能等于全电能与畸变电能之差的算法。该算法由哈尔滨理工大学学者提出，但畸变电能计量在工程实施上缺乏有效方法。

该冲击负荷表采用的新技术：

•国内首次提出在非线性信号条件下，消耗电能等于全电能与畸变电能之差算法的产品实施方案，即由采集非线性电压、电流波形，经乘数字法器将两个全波信号点积求和，得到全电能；再由非线性电压或电流波形，分别经基于LMS算法的自适应陷波滤波器滤去基波后，由数字乘法器将两个畸变信号点积求和，得到畸变电能。

注：LMS自适应算法-最小均方算法，是一种最陡下降算法的改进算法。该算法不需要已知输入信号和期望信号演变特征，只需要“当前时刻”的权系数再加上一个负均方误差梯度的比例项求得。其具有复杂程度低的优势，使LMS算法成为稳定的好、应用最广泛的算法。

•为准确反应冲击负荷的瞬时动态信号，采用高速采样及宽量程无级放大技术。工频每周期分析1次，动态跟踪谐波变化。

•提高有功计量、无功计量、谐波计量准确度：有功计量0.2S级；无功计量1级；采用新型传感器和结合专用算法，2-50次谐波功率误差低于1%。

汇总以上叙述，威胜的高精度冲击负荷表数字乘法器，计算全电能、畸变电能分别采用点积求和算法；其中，还采用基于LMS算法的自适应陷波滤波器技术。

— 2011年，威胜推出中国第一台DTS341 -MA1型、0.1S级采用数字乘法器的高准确度结算关口表。

本部分内容摘自威胜集团发表的《复化Newton-Cotes积分算法在电表计量中的应用》、《一种高精度动态角差补偿算法》文稿，并经编辑而成。

0.1S级关口表的有功计量采用基于Newton-Cotes高阶积分算法。其应用的新技术：

·采用8路24位高精度A/D，分辨率12.8k。

·有功计量点积运算直接沿用积分运算的基本定义。

当输入信号不再是正弦波，含有最高n次谐波时，信号的采样频率须保证在3n点以上；使用Newton- Cotes公式时，采用复化求积法。它首先利用Newton- Cotes求积公式，求出若干子段上的积分值，然后累加求和作为所求积分的近似值。几阶Newton-Cotes公式至少有几次代数精度。

·高精度动态角差补偿算法。先采用单点一阶牛顿插值算法，再采用基于FIR滤波器的补偿算法，研究提出补偿频率、温漂、时漂影响的动态角差补偿公式（略），并编制动态角差补偿流程。

高精度动态角差补偿算法：准确度高、基本不受频率影响；一致性好，同批次产品具有一致性；稳定性好，基本不受温漂影响。由此，弥补牛顿插值法准确度低和FIR数字滤波器补偿后幅值受频率影响严重问题。

以上讨论说明，威胜的0.1S级关口表数字乘法器，主要采用复化Newton-Cotes求积算法和高精度动态角差补偿算法。

4 ）多方协同研发：新型冲击负荷计量电能表

本部分内容摘自：2023年2月，湖南省电力计量中心、威胜集团、湖南大学发表的《面向冲击负荷的新型电能表关键技术》，并经编辑而成。

— 该文提出冲击负荷计量采用瞬时功率脉冲直接累加电能的算法。

冲击负荷计量，主要保证负荷快速大幅度变动的情况下，全波电能计量的精度，即当瞬时功率累加值大于一个脉冲电量阀值时，则发出一个脉冲。电能表将该脉冲计入总电量累加池。单个脉冲时段的瞬时电量=（实际三相功率之和）·（单个脉冲时段）。总瞬时功率为一个频率为2ω的正弦波曲线。在动态负荷下，平均功率算法存在滞后性；而瞬时功率直接累加，则效果更好。冲击负荷表采用IIR无限冲击响应的低通滤波器，滤掉2ω分量，达到稳定的脉冲电量要求。

— 新型冲击负荷表采用的新技术：

·采用24位高精度A/D，采样频率160点/周波，保证电流输入范围内的有效运算位数。

·采用专用角差补偿滤波器来补偿电流相位，可以快速准确算出瞬时功率。

·采用零磁通电流互感器，对冲击负荷进行全波采集 ，电流输入通道具有10kHz带宽。

·采用DSP电路进行快速计算。

— 本文点评

由日本 赤木泰文提出的瞬时功率理论，主要应用在电力调节技术领域。这里，冲击负荷计量采用瞬时功率脉冲直接累加计算电量的文稿，还是首次看到。其瞬时功率累加值大于一个脉冲电量阀值时，发出一个脉冲，并计入总电量累加池。该文，采用“单个脉冲时段”定义，与“瞬时功率”定义不相符合。期望能补充“单个脉冲时段”取值的计算论证方法。

概括的说，多方协同研发的新型冲击负荷计量电能表数字乘法器，采用瞬时功率脉冲直接累加计算电量的算法；估计角差补偿滤波器采用专用算法，来补偿电流相位。

5）国网电科院

2012年2月，国网电科院专家发表 《基于IEC61850-9-1的电能数字算法研究》。

本部分内容摘自该文并经编辑而成。

数字化变电站安装的数字化电能表，不具有传感变换功能，只是电能计算器。

在实际电网中，非线性负荷的电压、电流波动周期，达不到50 Hz，导致电能表误差大的原因，有交流采集的频率特性影响，还有电能算法不同。

当积分周期很长时，如达到1min ，频域分解时，会出现很多低于50Hz甚至低到0.03Hz的线谱，使计算量大增，同时电能表输出电能脉冲1min的时间间隔，不能满足电能表校准要求。因此，数字化电能表不适合采用频域计算法进行有功功率和电能计算；而采用时域积分法 ，不存在电能脉冲时间间隔问题，只要积分值达到一个电能脉冲对应电能值，就可以发出脉冲。

在非线性负荷下，电压、电流有较大的波动，引起积分误差较大，数字化电能表需要采用补偿算法，即把前一个电能脉冲发出的电能计算值的超出部分，转到下一个电能脉冲计算，使得总电能计算误差减到足够小。

该文提出一种时域有功电能算法：（略）。该算法的特点是分别计算正向有功电能和反向有功电能。每kWh的电能计算误差理论上不超过单个电能脉冲电能值的1/10。

时域计算法，按时段计算，其测量细度与频率无关。因此，时域电能计算法对电能表检定效率不存在明显的影响。

该文还在国内首次提出：数字化电能表须把电能算法标准化，才能实现电能量值的准确和统一。

分析以上叙述，国网电科院提出的数字化电能表数字乘法器 ，采用时域积分法，直接适用于正弦波电能计量和非线性负荷计量；还采用两个电能脉冲之间电能量的补偿算法。

6 ）本文点评

目前，由网上搜索到的高端电能表数字乘法器实用算法类型汇总与分析 。

— 数字乘法器基本算法

•采用“压扩码编译码器”芯片和单片机的算法结构，其乘法算法尚待查询。

•频域复化点积算法

•瞬时功率脉冲直接累加计算电量的算法。

•时域积分算法

— 高端电能表：由数字乘法器基本算法或再加上配套算法/补偿算法，构成不同的测量类型。

•高端电子式电能表：频域复化点积算法

•具有谐波计量功能的三相多功能表：频域复化点积算法，加上傅立叶变换算法。

•基于频域计算的数字化电能表：频域复化点积

算法

•0.1S级关口表：频域复化点积算法，加上高精度动态角差补偿算法。

•高精度冲击负荷表：频域复化点积算法（计算全电能、畸变电能），加上基于LMS算法的陷波滤波器。

•新型冲击负荷电能表：瞬时功能脉冲直接累加计算电能的算法，加上补偿电流相位的角差补偿滤波器算法。

•基于时域计算的数字化电能表：时域积分法，加上两个电能脉冲之间电能值的补偿算法 。

— 同一类高端电能表数字乘法器，采用实用算法类型不同

•冲击负荷电能表

其一，频域复化点积算法，加上基于LMS算法的陷波滤波器。

其二，瞬时功率脉冲直接累加计量电能的算法，加上补偿电流相位的角差滤波器算法。

•数字化电能表

其一，频域复化点积算法

其二，时域积分算法，加上两个电能脉冲之间电能值的补偿算法。

— 高端电能表：尽管电表性能质量符合标准要求，为何产品实际品质差异很大？

高端电能表性能质量符合电表标准要求，是指出厂误差及各项性能指标，都不超过误差限；对电能表误差稳定性和使用寿命没有明文规定。

高端电能表出厂误差及各项性能指标的误差限，是一个最高限值，也是一个误差可控范围。表计出厂误差及各项性能指标的实际误差，可高可低，但直接影响产品制造效率。可见，同一产品质量不处于同一个水准。

高端电能表高品质产品，是指出厂误差及各项性能指标，都控制在误差限范围的低值，同时，表计误差稳定，使用长寿命。因此，国际上，对高品质高端电能表都开出高价位。

综合以上情况，高端电能表实现高品质的要素：

•数字乘法器的基本算法类型及计算精度

•配套算法/补偿算法及计算精度

•高精度A/D性能

•高品质器件，包括电阻、电流互感器、零磁通电流互感器等。

•电能表硬件与软件设计方案

•可靠性设计方法及设计水准

•电能表产品工艺流程质量及老化工艺

•出厂误差及各项性能指标控制水准。

2 、0.2S级高端电能表：兰吉尔ZQ型关口表与国产多功能表的品质差异比较

本部分的国产多功能表性能，不包括威胜的高品质多功能表。

1 ）表计在功率因数为1时，5%In-Imax，出厂误差-负荷曲线。

— ZQ.型表：出厂误差小于0.05%；误差曲线带宽0.1%。

— 国产多功能表：出厂误差小于0.12%；误差曲线带宽0.24%。

2 ）表计在功率因数为0.5时，5%In- Imax，出厂误差-负荷曲线。

— ZQ型表：出厂误差小于0.08%；误差曲线带宽0.16%。

— 国产多功能表：（待查询）

3 ）表计在功率因数为1时，从0.05%In- Imax，出厂误差-负荷曲线。

— ZQ型表：出厂误差-负荷曲线为一条水平直线。轻载时高精度尤为突出，低负荷计量采用有源零磁通电流互感器。

— 国产多功能表：（待查询）

4 ）表计负荷功率因数变化对有功计量精度的影响

— ZQ型表：可忽略功率因数对有功计量精度的影响；表计在In时，相角在+/-90度+/-0.5度，计量误差为+/- 0.3%。

— 国产多功能表：功率因数变化对有功计量的影响，（待查询）；表计在In时，相角在+/-90度+/-0.5度，计量误差为+/-10%。

5 ）表计负荷功率因数变化对无功计量精度的影响

— ZQ型表；表计在In时，无功+/-90度+/-0.5度 ，计量误差为+/-0.6%。

— 国产多功能表：多数表计计量误差超过+/-10%，部分表计误差不稳定、跳字。

6 ）有效使用期

— ZQ型表：保证超过15年的高精度和高稳定性。

— 国产多功能表：（无此项要求）

7 ）表计电流量程过载范围宽

— ZQ型表：In为5A，表计测量范围170%In；

热参数电流达到12A。

— 国产多功能表：In为5A，Imax=120% In。

8 ）电压回路运行设计

— ZQ型表：具有电压回路失压和电压恢复时的时序设计。

— 国产多功能表：（无此项要求）

9 ）超级电容应用

— ZQ型表：超级电容在断电时的电压保持时间大于20天。

— 国产多功能表：（待查询）

10 ）表计指标系列

— ZQ型表：温度对精度影响低于IEC标准的5倍；运算速度是普通多功能表的5倍；电能脉冲输出分辨率是普通电能表的10倍；设计技术达到无少计、漏计电量的现象。

— 国产多功能表：（待查询）

11 ）第二套负荷曲线

— ZQ型表：具有第二套负荷曲线，扩展表计数据应用。如运行指导，SCADA，本地用户数据等。

— 国产多功能表：（待查询）

12 ）本文点评

兰吉尔ZQ型0.2S级关口表的高品质特征：

— 表计出厂误差小于准确度等级的25%，控制到低位；出厂误差带宽小于准确度等级的50%，出厂误差-负荷曲线平坦。

— 表计低负荷精度高，采用有源零磁通电流互感器。

— 表计可忽略功率因数对有功计量精度的影响，采用功率因数全补偿算法；在In时，相角为+/-90度+/-0.5度，有功计量误差控制到+/- 0.3%。

— 表计无功计量精度高。在In时，相角为无功+/-90度+/-0.5度，无功计量误差控制到+/-0.6%

— 表计误差稳定，保证超过15年的高精度和高稳定性。

— 表计温度性能优良，温度对精度影响低于IEC标准的5倍。

— 表计算力及数据处理能力强，运算速度是普通多功能表的5倍。

3、 建议：国产高端电能表高品质产品设计技术要求

2024年，电表企业将国产高端电能表实现高品质列为重点设计应用项目，有三方面的理由：首先，近几年，国内0.2S、0.1S级三相多功能表开发是个热点。国内高端电表市场竞争趋于紧张，各家高端电能表需要评估质量高低；其次，国产高端电能表出口国际高端电表市场，需要具有高品质作为基本条件；再是，兰吉尔0.1S/E级、E860系列高品质电能表 ，直接参与国内高端电表市场竞争。新一代高品质表计性能指标要求提升。

鉴于目前数字乘法器算法标准化，暂时难以实现。面对高品质高端电能表由电网关口计量点，扩展到电网全域、发电厂和大用户的市场机遇，研究提出国产高端电能表高品质产品设计技术要求，是适时的。

本文参考兰吉尔ZQ型0.2S级关口表、威胜0.1S级关口表的高品质技术设计经验，结合兰吉尔0.1S/E级、E860系列高品质电表提出的新一代表计功能和性能要求，提出以下国产高端电能表高品质产品设计技术要求：

1）准确度等级：D/0.2S、E/0.1S级

2）出厂误差控制在准确度等级25%以内；出厂误差-负荷曲阜带宽，控制在准确度等级50%以内，出厂误差- 负荷曲线平坦。

3）表计低负荷计量精度高（Ib=1.5A）：

计量从1%Ib(15mA) -6Ib(9A)的双向计量准确度+/-0.02%； 计量从0.1%Ib (1.5mA)- 1%Ib(15mA)的准确度+/-0.05%。

4）表计可忽略功率因数对有功计量精度的影响，采用功率因数全补偿算法；在Ib时，相角为+/-90度+/-0.5度，有功计量误差控制在+/-0.3%到+/-0.5 %。

5）表计无功计量准确度：0.5S级；在Ib时，相角为无功+/-90度+/-0.5度，无功计量误差控制在+/-0.5%到+/-1%。

6）表计误差稳定，保证超过20年的高精度和高稳定性，计量误差不超过计量准确度等级。

7）表计温度特性优良，温度对计量精度的影响，低于IEC标准的5倍。

8）表计算力及数据处理能力强，采用24位高精度A/D，高速DSP。

9）脉冲常数可达500000，有效减小低负荷的电能表检定时间。

10）负荷曲线记录容量20M字节。

11）采用模数分离的多层高性能PCB板。

12）扩展功能，包括宽频计量、冲击负荷计量要求；新能源接入电网引发干扰问题的电能质量监测；电网边缘计算功能应用。

结语

以上国产高端电能表高品质产品设计技术要求是建议稿，供国网、南网计量主管部门，具有前瞻性的省级电网和电表企业的参考。

还有，建议电表行业主管部门：利用国际、国内技术交流优势，对高端电能表数字乘法器实用算法类型进行汇总、分析，研究提出数字乘法器算法评估方法及测试要求。

参考文献

[1] 王乐仁;雷民;章述汉;基于 IEC 61850-9-1 的电能数字算法研究《电测与仪表》- 2012-02-25